DOI: 10.5846/stxb201601080052
高江波,焦珂伟,吴绍洪,郭灵辉.气候变化影响与风险研究的理论范式和方法体系.生态学报,2017,37(7):2169-2178.
Gao J B, Jiao K W, Wu S H, Guo L H.Theory paradigm and a methods system for research on climate change impacts and risks.Acta Ecologica Sinica, 2017,37(7):2169-2178.

气候变化影响与风险研究的理论范式和方法体系

高江波[1,*],焦珂伟[1,2],吴绍洪[1],郭灵辉[3]
1 中国科学院地理科学与资源研究所,中国科学院陆地表层格局与模拟重点实验室, 北京 100101
2 中国科学院大学, 北京 100049
3 河南理工大学测绘与国土信息工程学院, 焦作 454000

摘要:以全球变暖为主的气候变化将会在本世纪持续,针对气候变化影响与风险而采取适应和减缓措施,得到了国际社会的广泛认同。然而,气候变化影响与风险研究领域理论和方法并不规范,研究结果缺乏可比性。基于科学哲学家库恩提出的理论范式和构造范式概念,梳理、集成气候变化影响与风险研究的"脆弱性-要素分离-不确定性-风险"理论框架,总结相应的方法体系包括实地观测与科学实验、数值模型和统计方法、风险定量化评估框架等。气候变化影响与风险研究应遵循理论范式"四要素"的逻辑关系,综合运用多种分析方法,力求相关研究的整体性和系统化,以利增强气候变化影响与风险研究的科学性及其成果的应用指导意义。

关键词:气候变化影响;研究范式;理论范式;分析方法

Theory paradigm and a methods system for research on climate change impacts and risks

GAO Jiangbo[1,*], JIAO Kewei[1,2], WU Shaohong[1], GUO Linghui[3]
1 *Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100101, *China*
2 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*
3 *School of Surveying and Land Information Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo* 454000, *China*

Abstract: Adaptation and mitigation measures against climate change impacts and risks, especially global warming threats, have been widely accepted by the governments, scientists, and organizations. However, theories and methods for assessing climate change impacts and risks are not standardized, causing incomparable results for different sectors. Based on the conception of social and structural paradigms developed by Kuhn, this study first proposed the theory paradigm for research on climate change impacts and risks according to the logical ideas of "Vulnerability Separation Uncertainty Risks," and then summarized the corresponding analysis methods, including observations, experiments, models, statistics, and the framework of quantified risk assessment. Furthermore, based on the transferring logic of the four components of theory paradigm, systematic research on the climate change impacts and risks can be accomplished with synthetic application of different analysis methods. This study could be helpful in the advancement of studies on climate change impacts and risks, and enhance their application in tackling climate change.

基金项目:国家自然科学基金项目(41530749, 41301089);国家重点基础研究发展计划课题(2015CB452702);国家十二五科技支撑计划课题(2012BAC19B10, 2013BAC04B02)

收稿日期:2016-01-08; **网络出版日期**:2016-08-30

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: gaojiangbo@ igsnrr.ac.cn

Key Words: climate change impacts; research paradigm; theory paradigm; analysis methods

过去三十多年,国际科学界突出气候变化影响与风险研究[1-2],以界定气候变化的利弊影响、定量评估未来风险,为制定应对气候变化政策和行动提供强有力的科技支撑[3-4]。尤其是,政府间气候变化专门委员会(IPCC)组织编写的五次气候变化评估报告,凝练和评估了气候变化科学的最新进展,对推动气候变化事实及其影响研究的深入发展、扩大政府和公众对气候变化的科学认知做出了重大贡献。当前以应对全球环境变化为主线的"未来地球(Future Earth)"计划,旨在进一步定量揭示气候长期变化对自然生态系统服务和人类社会发展的重要影响,为地球环境的管理决策服务[5]。我国政府和科技界同样高度重视气候变化问题,迄今已发布三次《气候变化国家评估报告》,其第二部分重点评估气候变化影响与风险研究领域的最新成果,力求为应对气候变化工作提供坚实的理论基础。

在科学发展的推动和社会需求的刺激下,气候变化影响与风险已成为全球变化研究的前沿领域,近几十年来得到了蓬勃发展[6-8]。但是,IPCC 气候变化评估报告和我国发布的《气候变化国家评估报告》均显示,目前气候变化影响研究比较分散,尤其是未来风险定量评估薄弱;脆弱性和风险的综合评估理论落后,数据资料、模型方法、时空尺度缺乏可比性;评估技术体系不完善、应用过程需规范。总之,对气候变化影响与风险研究科学理论和方法体系并未充分重视,制约了该领域的创新发展,阻碍推进对气候变化影响和风险认识的深化。鉴于此,本文借鉴库恩的范式理论[9],对气候变化影响和风险研究的理论和方法进行挖掘、梳理、凝练和集成,以利推进科学理论、方法和技术体系的规范化和科学化。

1 气候变化影响与风险研究的理论范式

从广义上讲,范式是研究思维与方法的集成,是科学群体所认可的概念、方法和科学体系。英国学者玛格丽特·玛斯特曼将库恩的范式概括为 3 个方面[10]:一是作为一种信念、形而上学思辨, 它是哲学范式或元范式;二是作为一种科学习惯、学术传统、具体的科学成就,称为社会学范式或理论范式;三是作为一种依靠本身成功示范的工具、解疑的方法、或是用来类比的图像,即人工范式或构造范式。尽管范式的首要含义在哲学方面,然而库恩的创见和独到之处则在于范式的社会学含义和构造功能。库恩的社会学范式在应用模型和形而上学之间建立起一种新的相互关系,解决了从一般哲学理论转向实际科学议题的途径问题[11]。

本文运用范式的后两种含义,即理论范式与构造范式(分析方法),首先提出气候变化影响与风险研究的理论范式:以评估领域响应气候变化的脆弱性为基础,重点是分离气候因子在研究对象变化中的贡献,并以不确定性和复杂性分析为关键,最终实现气候变化风险预估的目标。这里所阐述的只是一般范式的范围,在气候变化影响与风险研究的不同发展阶段,上述各组成部分相对地位、侧重方面不同,如前期对不确定性关注较少,影响程度定量分离也不够深入。本部分从概念/内涵剖析及其应用案例角度对理论范式各组分进行论述。

1.1 脆弱性评估

IPCC 一直强调脆弱性在受体响应气候变化研究中的重要性,如在其第五次评估报告中进一步明确脆弱性内含的各种概念和要素,包括对危害的敏感性或易感性以及应对和适应能力的缺乏[1],通常敏感性越高,适应性越弱,系统越脆弱,反之亦然。脆弱性可以分为自然脆弱性和社会脆弱性,前者反映受体自然属性的特征,后者是描述整个社会系统在气候变化影响下可能遭受损失的一种性质。系统脆弱性是气候变化对自然和社会系统造成影响的内在原因,脆弱性评价不仅有利于科学家和决策者理解环境变化的影响,了解脆弱系统分布、脆弱性表现以及脆弱性成因,而且是气候因子影响程度辨识以及气候变化风险评估的基础。

通过总结各国学者对脆弱性的研究,Füssel 对情景、时空尺度、脆弱性概念进行了规范,界定了脆弱性评估的六个维度(表 1)[12]。进而,针对自然环境和社会经济两个领域,Klein 和 Nicholls 提出了脆弱性评估系统思路(图 1)[13],这一框架比 IPCC 提出的包含七个步骤的气候变化影响评估技术路线[14]更具操作性。基于脆弱性评估理论框架,我国学者对农业、水资源、自然生态系统响应气候变化的脆弱性已开展系统分析并获得

初步结论[15-18]。例如,研究发现,对比水稻产量随平均温度上升 1℃、日较差升高 1℃ 发生的变化,辐射下降 10%导致水稻脆弱区范围最大。

表 1　系统脆弱性评估界定的 6 个方面[12]

Table 1　Six domains for system vulnerability assessment[12]

维数 Dimension	内涵界定 Context
系统界定 System	评估领域的界定
关注的属性 Attribute of concern	生态系统功能、水资源供应等
灾害影响 Hazard	海平面上升、极端气候等
时间尺度 Temporal reference	当前/将来/动态的
空间尺度 Sphere	内部/外部/跨尺度
评价领域/知识维 Knowledge domain	社会经济/自然/综合

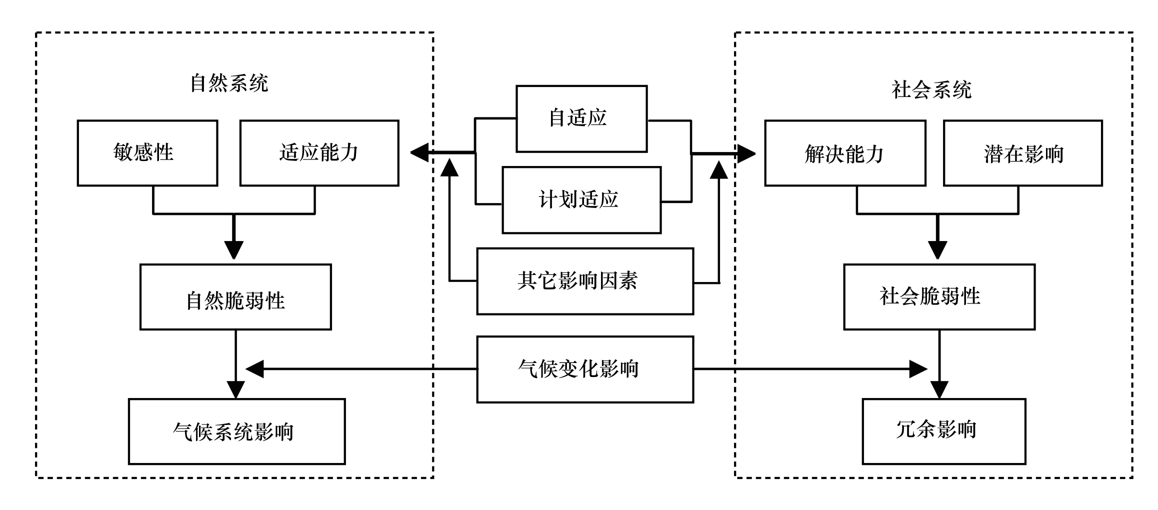


图 1　气候变化脆弱性评估的概念框架(改自文献[13])

Fig.1　A conceptual framework for climate change vulnerability assessment (redrawn from ref.[13])

1.2　气候因子影响程度辨识

相对于系统脆弱性而言,气候变化和人类活动共同作用是不同评估领域动态变化与空间异质的外在驱动,因而基于脆弱性研究成果,在已检测的变化趋势中能否分离出气候变化的影响程度,成为制约适应行动有效开展的瓶颈。IPCC 第五次评估报告更加强调气候变化影响的分离,指出气候变化对自然系统影响的证据是最全面的,对于人类系统的某些影响也可在一定程度上归因于气候变化[1]。我国重点领域气候变化影响程度分离工作总体欠缺,导致对气候变化影响程度与范围的评价存在较大的不确定性,当前仅对农业产量变化和水资源演化过程中气候与非气候因素的作用程度进行定量分离。例如,陶福禄等揭示了品种、管理、气候变化及各气候变量等因子对过去 30 年作物物候和产量变化的贡献[19];一些学者对中国实测径流减少最为明显的海河流域、黄河中游和辽河流域河川径流变化的进行归因[20-21]。

气候变化往往综合作用于自然和社会经济系统,因而其影响与风险呈现综合交叉的特征。我国《第三次气候变化国家评估报告》在农业、森林与其他自然生态系统的章节[2],对于评估领域与其他部分的交互作用进行初步剖析,如指出气候变化对农业的影响与水资源受到的影响密切相关,而要解决水资源的问题,又可能涉及到自然生态系统的水源涵养服务。IPCC 第五次评估报告[1]进一步指出,与气候有关的危害通过影响生计、减少农作物产量或毁坏民宅等方式直接影响贫困人口的生活,并通过诸如粮食价格上涨和粮食安全风险增加等间接影响其福祉(高信度)。因此,应研发跨部门、跨领域的综合评估模式,建立环境、生态、社会、经济的联系,增强气候变化影响的链式传递关系与影响程度辨识研究。

1.3 不确定性分析

气候变化影响与风险研究中的不确定性来源主要包括：一是观测信息依然匮乏，二是对气候变化以及受体响应过程和机理认识不足，三是核心技术和方法亟待完善。因而对于评估中有关脆弱性、气候影响分离、未来风险等发现的确定性程度的判断，取决于证据（包括数据、机理认识、理论、模式、专家判断等）的类型、数量、质量及其一致性程度[1]。

对于气候变化的基本事实和演化趋势而言，由于气候系统过程与反馈极其复杂，对当前的气候系统缺乏足够的科学认识[22]，现有各种气候模式对地球辐射能量平衡、云及降水等的模拟差别较大，不确定性强，对未来气候情景预估难以令人信服[23-24]。在受体响应气候变化的脆弱性研究方面，适应性的存在使系统不同组分之间及组分与外界环境之间形成反馈，进而促使整个系统随着气候的变化而调节自身的行为和结构，呈现出显著的不确定性和复杂性特征（包括非线性、临界性等）[25]。例如，融合升温和碳施肥实验以及数值模拟和分析技术，发现随着 CO_2浓度升高，植物光合作用的最适温度增加[26-27]、光合速率提高[28]，但同时高温可能导致作物减产，随着温度的进一步升高甚至可能迫使系统逆向演替[29-31]。

物理机制模型的适用性和不确定性尚需深入研究，这包括受体适应过程及其时空异质性导致对模型特征、前提假设和约束条件的认识不足；基于站点尺度的模型对于区域尺度气候变化影响的模拟存在尺度转换的难题。Walker 等[32]将基于机理模型模拟的不确定性归纳 5 个方面：背景、初值、模型结构、参数、模拟技术。因此，当使用气候变化情景数据驱动领域评估模型以评价气候变化影响和风险时，不确定性呈近似瀑布状传播[32-33]。进而，由于受体响应过程的复杂性、评估数据与模型应用的适用性等问题的综合效应，气候变化影响程度定量分离、未来风险预估等工作中的不确定性会进一步放大。

1.4 风险识别与评估

对气候变化风险进行识别和定量评估是风险管理和适应气候变化的基础科学问题。IPCC 第五次评估报告将风险表述为危害性事件或趋势发生的概率乘以这些事件或趋势造成的后果[1]，体现了脆弱性、暴露量和危险性综合作用的结果。与传统自然灾害风险相类比，气候变化与极端事件可视为风险源；承险体为受气候变化和极端事件影响的社会经济和资源环境，其中暴露度为承险体的"量"，脆弱性则反映了承险体的"质"（图 2）。气候变化风险最基本的性质可归纳为未来性、不利性和不确定性，即分别从时间的角度、后果的角度以及后果的表征上揭示气候变化风险的本质特征[34]。

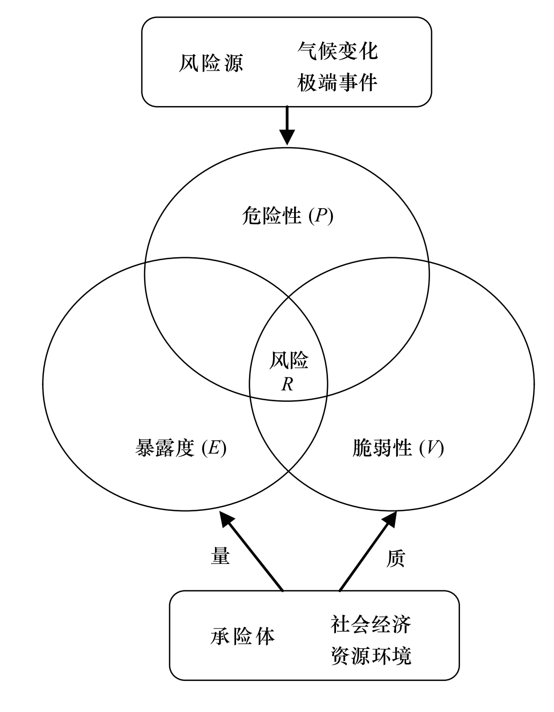


图 2 气候变化风险构成

Fig.2 Components for climate change risk

IPCC 第五次评估报告特别指出由于非气候因子和多方面不公平造成的脆弱性和暴露度的差异导致了气候变化风险的不同，尤其是在社会、经济、文化、政治、体制上或其它方面被边缘化的人们通常对气候变化影响以及对某些气候变化适应与减缓响应是高度脆弱的，而且由于人类和自然系统的相互联系，其未来响应的脆弱性、暴露度的不确定性很大。风险评估方法[35]可将影响评价的不一致结果纳入风险评估框架之内，在充分考虑气候变化影响评价中不确定性的基础上，对系统可能遭受的风险进行定量或定性描述，从而将风险评价与决策制定耦合起来。

同时，在 IPCC 评估报告中，突出强调了"关键风险"的概念，即社会经济和生态系统暴露于高危险或呈现高脆弱度时的气候变化风险，其界定标准包括：影响幅度大、概率高或不可逆，影响的时机，风险造成的持续暴

露及脆弱,通过适应或减缓降低风险的潜力有限;并指出当前已在人体健康、基础设施、粮食安全、生态系统等领域检测出关键风险。相比而言,我国学者对于风险的研究要薄弱得多,如在《第三次气候变化国家评估报告中》,大部分相关内容为评估领域未来演化趋势预估,对于关键风险识别与风险定量评估显得欠缺。

2　气候变化影响与风险研究的方法体系

目前国内外已经形成了丰富的气候变化影响研究方法,如通过实验、模型、对比等手段揭示脆弱性,通过统计与数值分析方法辨识受体变化过程中的气候影响程度,借助数值模式进行未来风险的识别与预估,采用统计方法分析气候变化影响与风险评价中的不确定性。这些方法归纳起来,大致分为:根据清查、普查、遥感等的观测技术,借助实验装置的模拟技术,气候、生态、水文、作物等数值模式与统计模型,脆弱性和风险评估分析框架等。此外,IPCC 发布的 6 次评估报告以及国内完成的 3 次气候变化国家评估报告,高度集成了近年主要领域气候变化影响研究成果,为影响与风险评估提供了某种标杆。

2.1　实地观测与科学实验

2.1.1　观测技术

随着对地观测技术的发展,对陆地表层变化信息的获取实现了前所未有的覆盖度,获得了全球高时空精度的监测资料[36],再加上各类社会经济普查资料和统计数据,促使气候变化影响从过去对地理环境变化现象的定性分析转向抽象概括、定性与定量相结合。如在 IPCC 评估报告中集成近 40 年各地自然系统(冰雪、冻土、水文和海岸带)和生物系统(陆地、海洋、淡水生物系统)的约 29000 个资料序列,揭示自然和生物系统发生的显著变化,如冰冻范围退缩及伴生的冰川湖泊扩张、河湖水温升高而影响水环境、陆地生态系统中春季物候提前、物种向两极和高海拔地区推移、海平面上升导致海岸带灾害风险增大、海温升高导致珊瑚更加脆弱,等等[37]。此外,诸如树轮生态学等的发展极大地扩展了气候变化影响研究的时间跨度[38]。

2.1.2　实验技术

近年来,各种实验模拟装置和技术在气候变化对动植物影响研究领域得到迅速发展,例如,借助不同生态系统的开顶式同化箱(OTC)升温实验、自由 CO_2气体施肥实验(FACE)、移地实验(TSSV)和多因子控制实验,揭示气候变化下的植物生理生态学效应以及种群或群落的脆弱性。然而,这些实验大多基于 CO_2浓度加倍、温度升高等进行单因子变化的影响研究[39-40],综合考虑 CO_2浓度升高、增温、降雨量和辐射变化等多因子组合,客观分析全球气候变化影响过程的研究仍较少[41-45]。此外,该类技术的应用过程中,如何将典型物种研究成果应用到生态系统、景观或区域尺度,尚需深入研究。总之,观测和实验技术水平的提高从根本上推进了气候变化影响的机制研究,拓展了对陆地表层要素与格局变化的认识。

2.2　数值模型和统计方法

2.2.1　气候模式与评估领域模型

气候变化影响与风险研究中的数值模型包括:全球/区域气候模型;生态、水文、作物等领域评估模型。历史气候数据可通过气象站点观测资料插值、遥感反演、代用资料气候重建等手段,但对于未来气候变化情景,主要依靠气候模式,包括全球气候模式(GCM)和基于动力降尺度的区域气候模式(RCM)。统计降尺度常与 RCM 同时使用,以考察降尺度方法本身的不确定性。在此基础上,对未来气候变化的预估还依赖于温室气体排放情景,当前尤以 IPCC 在第五次评估报告应用的典型排放浓度路径(RCPs)情景为代表[46]。

领域机理模型被广泛应用于各领域气候变化的影响评估及对未来风险的预估,包括区域生物地球化学模型(CENTURY、SIB2)、动态植被模型(IBIS、LPJ)、农业作物模型(DSSAT、CERES、SUBSTOR)、分布式水文水资源模型(VIC、SWAT)等(表 2)。各类模式在过程细化、模块扩展、领域交叉等方面不断改进完善。例如,传统的"平衡生态模型"在预测陆地生态系统未来变化方面表现出局限性,动态植被模型的出现为解决这一问题提供了有效途径,它们可模拟植被的生理过程、演替过程、植被物候和营养物质循环等过程,综合考虑全球变化和人为干扰对陆地生态系统产生的不同影响及其"时滞效应",有助于更合理地模拟气候变化下陆地生

态系统演变过程[47-48]，该类模型已被用于我国生态系统脆弱性的评估[49]。

表 2　部分领域气候变化影响评估机理模型

Table 2　Mechanism models for assessment on climate change impacts

模型分类 Classification	模型名称 Name(1)	模型主要方案机理 Main scheme mechanism
生物地球化学模型	CASA	以生产力模型和经验光能利用率计算 NPP
Biogeochemical model	SIB2	土壤植被大气与环境模型耦合
	CENTURY	土壤 C、N 机理模型与地下植被过程耦合
动态植被模型	TRIFFID	强调植物生理过程，包括碳、氮相互作用
Dynamic global vegetation model	IBIS	大气-生物模型耦合，模拟大气环流的能流和水循环
	LPJ	以气候、土壤质地和 CO_2 数据作为输入，模拟植被与环境的碳水交换过程
水文水资源模型	VIC	通过土壤、植被、水文和背景参数模拟网格内土壤蓄水能力的变化
Hydrology and water resources model	SWAT	主要用于模拟蒸散发、地表径流、土壤水、地下水过程
农业作物模型	DSSAT	集成多个作物生长模型，模拟作物发育过程、光合作用等基本生理生态过程
Crop model	CERES	针对不同作物，模拟其生理与生产过程，以及土壤与植物的养分平衡、水分平衡等过程

(1) CASA：Carnegie-Ames-Stanford Approach；SIB2：Simple Biosphere Mode；TRIFFID：Top-down Representation of Interactive Foliage and Flora Including Dynamics；IBIS：Integrated Biosphere Simulator；LPJ：the Lund-Potsdam-Jena Dynamic Global Vegetation Model；VIC：Variable Infiltration Capacity；SWAT：Soil and Water Assessment Tool；DSSAT：Decision Support System for Agrotechnology Transfer；CERES：Crop Environment Resource Synthesis

针对领域机理模型应用过程中存在的不确定性，基于区域尺度，选择综合集成方法进行气候变化影响的定量评估是一个可行的发展方向，包括推进观测实验、野外调查与多情景分析、多模型模拟、整体与个体相结合的综合集成评估方法，以客观揭示区域系统脆弱性和适应性机制，进而为发展有效的适应技术提供科学依据。

2.2.2　统计方法

重点领域脆弱性及其影响的气候归因等领域中运用的统计方法日渐丰富[19,21]。参数化的统计方法如聚类(系统聚类、模糊聚类等)、主成分分析等应用最为广泛，此外层次分析法、因子判别分析法、专家打分法、模糊综合评判法、关联树法在农业及水资源等领域的影响分离研究中也有采用。非参数化方法尤其是人工神经网络模型是区域评估工作常用的定量方法之一，近年来已逐步拓展了一些非参数化的机器学习算法，如支撑矢量机、粗集方法等。除此之外，GIS 的空间分析功能在气候变化影响研究中同样应用广泛，影响与风险的空间异质性得到表达。

统计方法是剖析不确定性的重要手段。一些不确定性可用量化的度量表示(如不同模式计算值的一个变化范围)，而另一些不确定性可进行定性描述，如体现一个专家组的判断，可表述为对某些科学发现认识的信度。IPCC 第五次评估报告中处理不确定性的方法就有定性和定量两种：信度法和概率法[46]。此外，不确定性的定量分析方法还包括：局部敏感性分析和全局敏感性分析、普适似然不确定性估计方法(GLUE)、集合模拟以及贝叶斯建模等[50]。由于综合考虑了多种不确定因素，由集合模拟或贝叶斯分级建模产生的概率型气候情景可以直接用于风险评估，进而实现基于风险的影响评估[51-52]。例如，Luo 等人[53]综合考虑了 GCMs 模式、温室气体排放情景、气候敏感性及区域响应等的不确定性，研究风险评估框架下气候变化对南澳大利亚小麦产量的影响。

2.3　风险定量化评估框架

基于气候变化风险组成的三要素：气候变化、受体脆弱性和暴露量，当前实现风险定量化的评估模型主要分为两类：

第一类是建立在传统自然灾害风险评估模型基础上，风险的定量化程度是气候变化与极端气候事件的危

险性、承灾体脆弱性与暴露量相乘的结果[54]。这类模型具有很好的研究基础,评价指标意义明确,对适应能力也有一定的考虑,但模型出发点侧重于气候的危险性,如果对气候变化影响机制,尤其是间接影响途径不明确,将导致该类模型的应用受到限制。通过构建大尺度融合敏感性和适应性的脆弱性曲线,此类气候变化灾害风险评估模型,已被应用我国重大气象水文灾害(包括高温、洪涝、干旱等)风险综合定量评估中[55]。

第二类模型从系统的脆弱性出发,基于系统可应对范围的临界阈值,风险表达式为:风险 = P(脆弱性)[56],即脆弱临界阈值被超越的概率。这类模型首先对系统的脆弱性进行标定,以数量大小或频率等指标进行表征,进而考察未来气候变化是否会对既定脆弱性产生威胁,将超过既定标准事件(阈值)或其发生的概率表征为风险。这一风险表达形式有利于实现在气候危险性难以度量、影响途径复杂、风险链不清晰的情况下的风险评估。例如,Wu 等基于未来生态系统生产功能预估,以脆弱性阈值标定了气候变化风险及等级[18]。

此外,指标体系法常用于风险与脆弱性评估模型的建立[57],包括:(1)压力指标,如升温、降水减少和极端天气等;(2)状态指标,如生态系统质量、生物多样性、生态服务等;(3)响应指标,如系统的适应度、人类采取的适应气候变化风险的措施等。确定评价指标体系后,一般运用系统分析等统计学方法将所研究的问题分成若干个有序的层次进行评价。

3　结论与讨论

本文对气候变化影响与风险研究的理论范式和方法体系进行归纳、剖析。一般来说,理论范式是一种研究过程中的逻辑演绎,是一个学科或方向构建起来的主体框架;而分析方法则是实现理论的方法归纳,表现为计量分析和案例研究两种形式,是丰富学科发展的重要工具[58]。推动气候变化影响与风险研究的理论与方法的规范化,以提升相关研究科学性和系统性,可期为减缓极端事件造成的不利影响,实现有序适应气候变化提供科学支撑。

气候变化影响与风险研究的理论范式,遵循"脆弱性-要素分离-不确定性-风险"的逻辑思路(图 3),即以脆弱性研究作为基础,分离不同气候要素的影响程度,并以不确定性分析贯穿始终,最后形成气候变化的过去影响和未来风险两个研究中心。特别需要指出的是,气候变化影响与风险评估应基于不同领域脆弱性特征的辨识,但这些领域往往受到气候因素和人类活动的交叉作用,因而需加强气候要素影响程度的分离,以利增强影响评估的科学性。由于认识水平和分析工具的限制,目前并未有效区分出人类活动和其它非气候因素的干扰贡献,导致我国对气候变化影响与风险程度和范围的评价存在较大的不确定性,严重制约应对气候变化行动的实施效果。

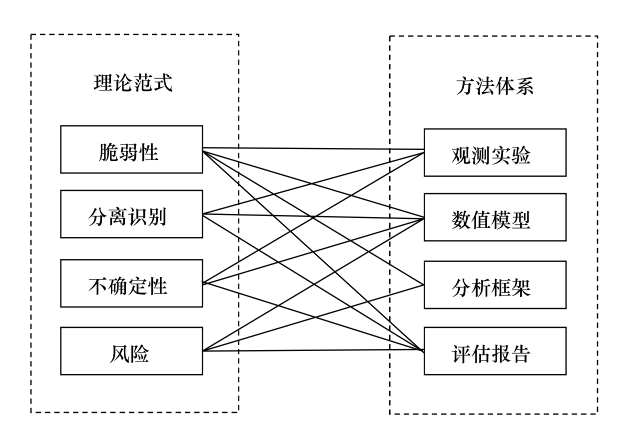


图 3　气候变化影响与风险研究理论范式与对应的分析方法

Fig.3　Theory paradigms for research on climate change impacts and risks and their corresponding analysis methods

在气候变化影响与风险研究开展的过程中,理论范式的 4 个要素相互促进、互为反馈、逻辑演化。然而在当前的研究过程中还没有形成特定的系统化模式,多数研究只是从理论范式的某个环节入手,理论体系与逻辑框架的落实并不充分,例如风险研究仅仅是对未来趋势预估,没有结合脆弱性反映出定量评估结论[20];不确定性分析多集中于不同模型的性能对比,对风险形成过程中不确定性传递的研究还很少[32]。理论范式所体现出来的链条式发展思路是确保研究工作完整性的必然要求,综合对比不同领域气候变化影响与风险研究,农业领域所完成的系列工作较为清晰的反映与贯彻上述理论范式:首先,应用实地调查、案例研究、统计模型和综合评估的方法,进行农业气候脆弱性研究[19];进而,基于时间序列统计数据,借助统计模型和作物机理模型,在站点和区域尺度上识别气候变化对不同农作物产量的贡献[59];最终,使用未来情景下农作物产量的

模拟值相对于基准情景变化的累积概率对气候变化影响的不确定性进行分析,并对农业领域关键风险进行识别和定量评估[60-61]。

观测技术、控制实验、统计分析及机理模型等方法是气候变化影响与风险研究理论范式实践的支撑手段,在农业、水资源、生态系统、海岸带等领域中不断创新发展。其中,观测与实验技术可以直接获得大量的研究数据,用以评价结果和验证假设,但常常受限于客观条件,与自然条件相比还存在较大差异,难以在大尺度上对复杂问题进行系统研究。随着人们对气候变化影响过程认识的不断深化,数值与统计模型的研究得到了不断的发展和完善,并将成为今后系统研究气候变化影响与风险的重要方法。然而模型在运行的过程中需要进行一系列假设,对现实条件进行简化,这就会增大模拟结果的不确定性。因此在今后的研究中,应采取多指标的影响和风险综合评估,充分利用观测实验及历史数据校正模型参数,并实现机理模型与区域气候系统的耦合,综合考虑多对象、多因素的影响,以减少研究过程中的不确定性。例如,基于样带调查和空间分析,使用多情景分析协调配合,辨识气候变化对生态系统影响的脆弱性及适应性[62]。

参考文献(References):

[1] IPCC. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group Ⅱ to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. UK: Cambridge University Press, 2014.

[2] 《第三次气候变化国家评估报告》编写委员会. 第三次气候变化国家评估报告. 北京: 科学出版社, 2015.

[3] 刘燕华, 钱凤魁, 王文涛, 葛全胜, 马翠梅, 张九天, 何霄嘉. 应对气候变化的适应技术框架研究. 中国人口·资源与环境, 2013, 23(5): 1-6.

[4] 吴绍洪, 黄季焜, 刘燕华, 高江波, 杨军, 王文涛, 尹云鹤, 栾浩, 董婉璐. 气候变化对中国的影响利弊. 中国人口·资源与环境, 2014, 24(1): 7-13.

[5] Future Earth. Future earth initial design: report of the transition team. Paris, FRA: International Council for Science (ICSU). (2013) [2015-12-30]. http://www.futureearth.org/media/future-earth-initial-design-report.

[6] Frank D C, Esper J, Raible C C, Büntgen U, Trouet V, Stocker B, Joos F. Ensemble reconstruction constraints on the global carbon cycle sensitivity to climate. Nature, 2010, 463(7280): 527-530.

[7] Van Vuuren D P, Riahi K, Moss R, Edmonds J, Thomson A, Nakicenovic N, Kram T, Berkhout F, Swart R, Janetos A, Rose S K, Arnell N. A proposal for a new scenario framework to support research and assessment in different climate research communities. Global Environmental Change, 2012, 22(1): 21-35.

[8] Ge Q S, Wang H J, Rutishauser T, Dai J H. Phenological response to climate change in China: a meta-analysis. Global Change Biology, 2015, 21(1): 265-274.

[9] 托马斯·库恩. 科学革命的结构. 金吾伦, 胡新和, 译. 北京: 北京大学出版社, 2012: 7-10.

[10] 黄欣荣. 复杂性范式的兴起与科学世界观的变革. 河北师范大学学报: 哲学社会科学版, 2009, 32(3): 52-57.

[11] 李双成, 王羊, 蔡运龙. 复杂性科学视角下的地理学研究范式转型. 地理学报, 2010, 65(11): 1315-1324.

[12] Füessel H M. Vulnerability: a generally applicable conceptual framework for climate change research. Global Environmental Change, 2007, 17(2): 155-167.

[13] Klein R J T, Nicholls R J. Assessment of coastal vulnerability to climate change. Ambio, 1999, 28(2): 182-187.

[14] The United Nations Framework Convention on Climate Change. Compendium on methods and tools to evaluate impacts of, and vulnerability and adaptation to, climate change. Bonn, Germany: UNFCCC Secretariat, 2008.

[15] Tao F, Zhang Z, Shi W J, Liu Y J, Xiao D P, Zhang S, Zhu Z, Wang M, Liu F S. Single rice growth period was prolonged by cultivars shifts, but yield was damaged by climate change during 1981-2009 in China, and late rice was just opposite. Global Change Biology, 2013, 19(10): 3200-3209.

[16] 熊伟, 杨婕, 吴文斌, 黄丹丹, 曹阳. 中国水稻生产对历史气候变化的敏感性和脆弱性. 生态学报, 2013, 33(2): 509-518.

[17] 张建云, 王国庆, 贺瑞敏, 刘翠善. 黄河中游水文变化趋势及其对气候变化的响应. 水科学进展, 2009, 20(2): 153-158.

[18] Wu S H, Yin Y H, Zhao D S, Huang M, Shao X M, Dai E F. Impact of future climate change on terrestrial ecosystems in China. International Journal of Climatology, 2010, 30(6): 866-873.

[19] Tao F L, Zhang Z, Zhang S, Zhu Z, Shi W J. Response of crop yields to climate trends since 1980 in China. Climate Research, 2012, 54(3): 233-247.

[20] Bao Z X, Zhang J Y, Wang G Q, Fu G B, He R M, Yan X L, Jin J L, Liu Y L, Zhang A J. Attribution for decreasing streamflow of the Haihe River basin, northern China: climate variability or human activities?. Journal of Hydrology, 2012, 460-461: 117-129.

[21] 张建云, 贺瑞敏, 齐晶, 刘翠善, 王国庆, 金君良. 关于中国北方水资源问题的再认识. 水科学进展, 2013, 24(3): 303-310.

[22] 秦大河, 陈振林, 罗勇, 丁一汇, 戴晓苏, 任贾文, 翟盘茂, 张小曳, 赵宗慈, 张德二, 高学杰, 沈永平. 气候变化科学的最新认知. 气候变化研究进展, 2007, 3(2): 63-73.

[23] Taylor K E, Stouffer R J, Meehl G A. An overview of CMIP5 and the experiment design. Bulletin of the American Meteorological Society, 2012, 93(4): 485-498.

[24] 张雪芹, 彭莉莉, 林朝晖. 未来不同排放情景下气候变化预估研究进展. 地球科学进展, 2008, 23(2): 174-185.

[25] Holland J H. Hidden Order: How Adaptation Builds Complexity. New York: Addison-Wesley Publishing Company, 1995: 15-20.

[26] Leakey A D B, Uribelarrea M, Ainsworth E A, Naidu S L, Rogers A, Ort D R, Long S P. Photosynthesis, productivity, and yield of maize are not affected by open-air elevation of CO_2 concentration in the absence of drought. Plant Physiology, 2006, 140(2): 779-790.

[27] Lessin R C, Ghini R. Effect of increased atmospheric CO_2 concentration on powdery mildew and growth of soybean plants. Tropical Plant Pathology, 2009, 34(6): 385-392.

[28] Kang S Z, Zhang F C, Hu X T, Zhang J H. Benefits of CO_2 enrichment on crop plants are modified by soil water status. Plant and Soil, 2002, 238(1): 69-77.

[29] Schimel D. Climate change and crop yields: beyond Cassandra. Science, 2006, 312(5782): 1889-1890.

[30] Prasad P V V, Boote K J, Allen Jr L H, Sheehy J E, Thomas J M G. Species, ecotype and cultivar differences in spikelet fertility and harvest index of rice in response to high temperature stress. Field Crops Research, 2006, 95(2/3): 398-411.

[31] Reddy A R, Rasineni G K, Raghavendra A S. The impact of global elevated CO_2 concentration on photosynthesis and plant productivity. Current Science, 2010, 99(1): 46-57.

[32] Walker W E, Harremoës P, Rotmans J, van der Sluijs J P, van Asselt M B A, Janssen P, von Krauss M P K. Defining uncertainty: a conceptual basis for uncertainty management in model-based decision support. Integrated Assessment, 2003, 4(1): 5-17.

[33] New M, Hulme M. Representing uncertainty in climate change scenarios: a Monte-Carlo approach. Integrated Assessment, 2000, 1(3): 203-213.

[34] 吴绍洪, 潘韬, 贺山峰. 气候变化风险研究的初步探讨. 气候变化研究进展, 2011, 7(5): 363-368.

[35] Jones R N. An environmental risk assessment/management framework for climate change impact assessments. Natural Hazards, 2001, 23(2/3): 197-230.

[36] Boyd D S. Remote sensing in physical geography: a twenty-first-century perspective. Progress in Physical Geography, 2009, 33(4): 451-456.

[37] IPCC. Climate Change 2007: the Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. UK: Cambridge University Press, 2007.

[38] 葛全胜, 郑景云, 郝志新, 刘浩龙. 过去 2000 年中国气候变化的若干重要特征. 中国科学: 地球科学, 2012, 42(6): 934-942.

[39] 孙芳, 杨修. 农业气候变化脆弱性评估研究进展. 中国农业气象, 2005, 26(3): 170-173.

[40] 秦大河, 陈宜瑜, 李学勇. 中国气候与环境演变. 北京: 科学出版社, 2005: 50-54.

[41] 肖国举, 张强, 王静. 全球气候变化对农业生态系统的影响研究进展. 应用生态学报, 2007, 18(8): 1877-1885.

[42] Pendall E, Bridgham S, Hanson P J, Hungate B, Kicklighter D W, Johnson D W, Law B E, Luo Y Q, Megonigal J P, Olsrud M, Ryan M G, Wan S Q. Below-ground process responses to elevated CO_2 and temperature: a discussion of observations, measurement methods, and models. New Phytologist, 2004, 162(2): 311-322.

[43] Norby R J, Luo Y Q. Evaluating ecosystem responses to rising atmospheric CO_2 and global warming in a multi-factor world. New Phytologist, 2004, 162(2): 281-293.

[44] Matsunami T, Otera M, Amemiya S, Kokubun M, Okada M. Effect of CO_2 Concentration, temperature and N fertilization on biomass production of soybean genotypes differing in N fixation capacity. Plant Production Science, 2009, 12(2): 156-167.

[45] Wertin T M, McGuire M A, Teskey R O. The influence of elevated temperature, elevated atmospheric CO_2 concentration and water stress on net photosynthesis of loblolly pine (*Pinus taeda* L.) at northern, central and southern sites in its native range. Global Change Biology, 2010, 16(7): 2089-2103.

[46] IPCC. Climate Change 2013: the Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. UK: Cambridge University Press, 2014.

[47] Cramer W, Bondeau A, Woodward F I, Prentice I C, Betts R A, Brovkin V, Cox P M, Fisher V, Foley J A, Friend A D, Kucharik C, Lomas M R, Ramankutty N, Sitch S, Smith B, White A, Young-Molling C. Global response of terrestrial ecosystem structure and function to CO_2 and climate change: results from six dynamic global vegetation models. Global Change Biology, 2001, 7(4): 357-373.

[48] Sitch S, Huntingford C, Gedney N, Levy P E, Lomas M, Piao S L, Betts R, Ciais P, Cox P, Friedlingstein P, Jones C D, Prentice I C,

Woodward F I. Evaluation of the terrestrial carbon cycle, future plant geography and climate-carbon cycle feedbacks using five Dynamic Global Vegetation Models (DGVMs). Global Change Biology, 2008, 14(9): 2015-2039.

[49] Zhao D S, Wu S H. Vulnerability of natural ecosystem in China under regional climate scenarios: an analysis based on eco-geographical regions. Journal of Geographical Sciences, 2014, 24(2): 237-248.

[50] 姚凤梅, 秦鹏程, 张佳华, 林而达, Boken V. 基于模型模拟气候变化对农业影响评估的不确定性及处理方法. 科学通报, 2011, 56(8): 547-555.

[51] Naylor R L, Battisti D S, Vimont D J, Falcon W P, Burke M B. Assessing risks of climate variability and climate change for Indonesian rice agriculture. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2007, 104(19): 7752-7757.

[52] New M, Lopez A, Dessai S, Wilby R. Challenges in using probabilistic climate change information for impact assessments: an example from the water sector. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical Physical and Engineering Sciences, 2007, 365(1857): 2117-2131.

[53] Luo Q Y, Bellotti W, Williams M, Cooper I, Bryan B. Risk analysis of possible impacts of climate change on South Australian wheat production. Climatic Change, 2007, 85(1/2): 89-101.

[54] 王雪臣. 中国极端气候事件的风险分析及保险适应机制研究. 北京: 气象出版社, 2008: 25-28.

[55] 吴绍洪, 潘韬, 杨勤业. 中国重大气象水文灾害风险格局与防范. 北京: 科学出版社, 2014: 78-80.

[56] Jones R N, Mearns L. Assessing future climate risks//Lim L, ed. Adaptation Policy Frameworks for Climate Change: Developing Strategies, Policies and Measures. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2004: 119-143.

[57] 王宁, 张利权, 袁琳, 曹浩冰. 气候变化影响下海岸带脆弱性评估研究进展. 生态学报, 2012, 32(7): 2248-2258.

[58] 邓宏兵. 自然地理学发展的历史与动态初探. 华中师范大学学报: 自然科学版, 2003, 37(2): 269-272.

[59] 史文娇, 陶福禄, 张朝. 基于统计模型识别气候变化对农业产量贡献的研究进展. 地理学报, 2012, 67(9): 1213-1222.

[60] 刘玉洁, 陶福禄. 气候变化对小麦生物量影响的概率预测和不确定性分析. 地理学报, 2012, 67(3): 337-345.

[61] Ye L M, Xiong W, Li Z G, Yang P, Wu W B, Yang G X, Fu Y J, Zou J Q, Chen Z X, Van Ranst E, Tang H J. Climate change impact on China food security in 2050. Agronomy for Sustainable Development, 2013, 33(2): 363-374.

[62] 朱建华, 侯振宏, 张治军, 罗云建, 张小全. 气候变化与森林生态系统: 影响、脆弱性与适应性. 林业科学, 2007, 43(11): 138-145.